

*С. Е. Швецова, В. А. Палкин, В. И. Токманцев*

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

shvetsovasvev@gmail.com

## РАЗДЕЛЕНИЕ ИЗОТОПОВ БОРА В ОПТИМАЛЬНЫХ КАСКАДАХ ПРЯМОТОЧНЫХ ГАЗОВЫХ ЦЕНТРИФУГ

*Рассмотрена задача оптимизации двухкаскадной схемы прямоточных газовых центрифуг для разделения изотопов бора. Получены результаты минимизации суммарного количества центрифуг каскадов при помощи численно-аналитического метода. Также представлены расчёты оптимизации каскадов прямоточных газовых центрифуг численным методом Хука-Дживса.*

*Ключевые слова: прямоточная центрифуга; каскад газовых центрифуг; метод Хука-Дживса; изотопы бора; оптимизация.*

*S. E. Shvetsova, V. A. Palkin, V. I. Tokmantsev*

Ural Federal University, Ekaterinburg

## SEPARATION OF BORON ISOTOPES IN OPTIMAL CASCADES OF DIRECT-FLOW GAS CENTRIFUGES

*The optimization problem of a two-stage scheme of direct-flow gas centrifuges for the separation of boron isotopes is considered. The results of minimizing the total number of cascade centrifuges using the numerical-analytical method are obtained. Calculations of optimization of cascades of direct-flow gas centrifuges by the hook-Jeeves numerical method are also presented.*

*Keywords: direct-flow centrifuge, cascade of gas centrifuges, Hook-Jyves method, boron isotopes, optimization.*

Для атомной промышленности, космической техники и ядерной медицины необходим легкий изотоп бора  $^{10}\text{B}$  с концентрацией 80–95 %. Также существует потребность в чистом (с концентрацией 99,999 %) изотопе бора  $^{11}\text{B}$  для атомной промышленности и

ЯМР-спектроскопии. В работе предлагается использовать трёхпоточный каскад с симметричной противоточной схемой соединения ступеней, состоящих из прямоточных газовых центрифуг. Для оптимизации каскадов используется численный метод Хука-Дживса, гарантирующий высокую точность полученных результатов [1]. Расчеты проводились на основе модельной центрифуги Игуасу с центральным телом [2].

Анализ задачи оптимизации показывает, что общее число варьируемых параметров при заданных внешних составляет  $2n$ . К ним можно отнести число ступеней  $n$ , номер ступени подачи питания  $p$ , концентрацию отвала ступеней  $C_2^-, C_3^-, \dots, C_{n-1}^-$  и коэффициент разделения  $\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n$ .

Для численно-аналитических расчетов и численной оптимизации была написана компьютерная программа.

Расчеты проводились в 3 этапа.

1. Численно-аналитический расчет с разными коэффициентами разделения.
2. Выбор лучшего значения коэффициента разделения по результатам численно-аналитического расчета.
3. Численная оптимизация с помощью метода Хука–Дживса с исходными данными из численно-аналитического расчета.

В двухкаскадной схеме для первого каскада концентрация питания равна природной для  $^{10}\text{В}$  – 19,8 %. На отборе содержание  $^{10}\text{В}$  задавалось 95 %, а отвале 12,6 %. Поток отбора задавался для первого каскада 1 г/с. В данной схеме отвал первого каскада является питанием второго. Поток и концентрация питания для второго каскада соответственно равны 10,44 г/с и 12,6 %. На отборе второго каскада концентрация задавалась 19,8 %, а на отвале 0,001 % (соответствует концентрации  $^{11}\text{В}$  99,999 %).

Согласно численно-аналитическим расчётам, минимальному суммарному количеству центрифуг соответствует коэффициент разделения равный 1,040. Это значение было принято в качестве исходного для численной оптимизации методом Хука–Дживса.

### Сравнение суммарного количества центрифуг после оптимизации

Каскад	$n$	$p$	$\sum N$ при численно-аналитическом расчете	$\sum N$ после численной оптимизации	$\Delta N$
Первый	247	27	267444	267436	8
Второй	514	488	1127384	1127359	25

Как видно из таблицы, после численной оптимизации суммарное количество центрифуг незначительно уменьшилось.

Использование результатов численно-аналитической оптимизации каскада позволяет выбрать коэффициент разделения ступеней в начале численного расчета. Для такого коэффициента разделения результаты численно-аналитического расчёта мало отличаются от результатов оптимизации методом Хука–Дживса.

Таким образом, проведённые расчёты подтверждают эффективность использованных методов оптимизации.

### Список использованных источников

1. Методы оптимизации в примерах и задачах / А. В. Пантелеев, Т. А. Летова. СПб. : Лань, 2015. 512 с.
2. Токманцев В. И., Палкин В. А. Разделение стабильных изотопов бора в прямоточных газовых центрифугах // Атомная энергия. 2017. Т. 123, вып. 1. С. 40–44.